

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ, ВКЛЮЧАЮЩИМИ В СЕБЯ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Е. Д. Михов✉, А. В. Караванов

Сибирский федеральный университет
г. Красноярск, Российская Федерация

В статье рассматривается новый алгоритм управления системами с длительными переходными процессами. Актуальность исследования обусловлена растущим использованием малых космических аппаратов для различных целей, включая научные исследования, связь и наблюдение. Эти аппараты имеют ограниченный ресурс корректировки движения из-за износа дополнительных двигателей и ограниченного объёма рабочего тела. Разработка и внедрение новых алгоритмов управления, направленных на сокращение времени корректировки (переходного процесса), могут значительно повысить эффективность использования малых космических аппаратов. Это не только увеличит срок их службы, но и позволит расширить возможности их применения в различных областях. Разработанный алгоритм основан на непараметрической оценке функции регрессии и состоит из двух частей: накопленного опыта об объекте и поискового шага. В качестве объекта управления был взят безынерционный процесс, управляемый П-регулятором. В такой системе возникает переходный процесс. Для оценки эффективности управления было выбрано время переходного процесса как критерий. Проведённое сравнение показало, что управление системой с помощью П-регулятора менее эффективно по сравнению с разработанным алгоритмом. Результаты исследования могут быть полезны для разработки более эффективных систем управления, особенно в условиях, когда требуется высокая скорость регулирования.

Ключевые слова: П-регулятор, система управления, непараметрическая оценка функции регрессии, переходный процесс, малые космические аппараты.

Введение

В настоящее время малые космические аппараты (МКА) широко используются для решения различных задач, таких как научные исследования, связь, наблюдение и другие. Они представляют собой важный инструмент для развития космических технологий и расширения наших знаний о космосе. Однако каждый МКА имеет ограниченный ресурс корректировки движения, что обусловлено износом дополнительных двигателей и ограниченным объёмом рабочего тела.

Одним из способов повышения эффективности использования МКА является разработка и внедрение новых алгоритмов управления, направленных на сокращение времени корректировки (переходного процесса). Это позволит не только увеличить срок службы аппаратов, но и расширить возможности их применения в различных областях.

Целью данной работы является разработка алгоритма управления, основанного на непараметрической оценке функции регрессии, который позволит снизить время переходного процесса в объектах управления.

Результаты данной работы могут быть использованы для разработки более эффективных систем управления МКА, что позволит повысить их эффективность и продлить срок службы.

В настоящее время основными инструментами управления в различных отраслях являются П-, И- и ПИД-регуляторы [1–4]. П-регуляторы, И-регуляторы и ПИД-регуляторы остаются популярными благодаря своей простоте, эффективности, гибкости и широкому спектру применения.

Также для управления техническими системами активно применяются адаптивные (самонастраивающиеся) системы управления. Подобные системы управления позволяют настроить схему управления на эффективную работу без участия оператора и в настоящее время активно развиваются [5–8]. Используются адаптивные системы

✉ edmihov@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2025

во многих технологических, производственных процессах, а также в других областях человеческой деятельности (экономика, социология и др.).

Вышеописанные типы регуляторов при должной настройке качественно решают задачу управления различными процессами. Тем не менее разработка новых методов и алгоритмов управления, позволяющих снизить время переходного процесса, продолжает оставаться актуальной задачей.

В статье рассматривается задача эффективно-го управления системой, имеющей длительный переходный процесс. В качестве такой системы рассматривается совокупность из объекта управления и П-регулятора.

Дело в том, что если объект управления и управляющее устройство объединить в единую систему и относиться к ней как к отдельному объекту типа «черный ящик», то можно обнаружить, что эта система обладает некоторыми особенностями, например, может появиться меняющаяся от случая к случаю переходная функция (в связи с адаптацией алгоритма управления). Это превращает такую систему в достаточную и модифицируемую математическую модель для первичной апробации новых разрабатываемых алгоритмов управления.

1. Постановка задачи

Рассмотрим схему управляемого процесса (рисунок 1).

Модель, которая будет использоваться в эксперименте и имитировать управляемую систему, применяется только для получения выборки на-

блюдений. Важно отметить, что эта модель неизвестна алгоритму управления. В ином случае было бы разумно сформировать алгоритм управления, основанный на функциональной зависимости между входом и выходом.

В рамках статьи изучается процесс управления системой с непараметрической неопределенностью [9]. Соответственно, алгоритму управления известны только сведения качественного характера о процессе, например, то, что объект управления является безынерционным, имеется однозначное и единое соответствие между выходными параметрами и входными воздействиями.

Продемонстрируем схему управляемого процесса (рисунок 1):

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: $u(t)$ – управляемая переменная, $x(t)$ – выходная (контролируемая) переменная, $x^*(t)$ – внешнее задающее воздействие, $x_y(t)$ – задающее воздействие, сформированное адаптивным регулятором. Объект управления является безынерционным.

Задача состоит в формировании такого алгоритма адаптируемого регулятора, который позволит эффективно приводить управляемую систему к состоянию $x^*(t)$ с учетом возникшего переходного процесса. В качестве критерия эффективности взято время переходного процесса. Для управления переходными процессами используется принцип «перемены цели», описанный в [10]. Принцип «перемены цели» состоит в динамическом изменении целевых показателей системы на основе анализа текущей ситуации. Это позволяет оптимизировать процесс регулирования и уменьшить время перехода к желаемому состоянию.

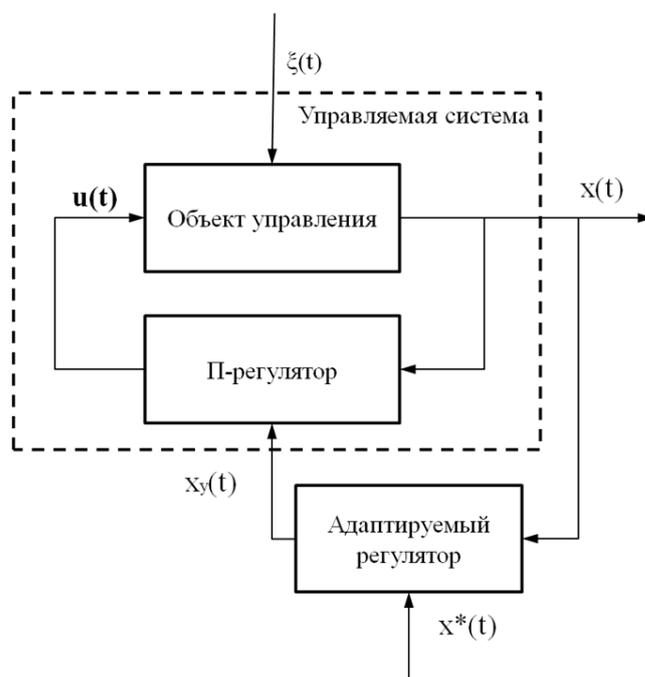


Рисунок 1. Схема управляемого процесса

2. Непараметрическая оценка функции регрессии

Непараметрическая регрессия – это метод статистического анализа, который используется для построения непараметрической функции, связывающей несколько переменных [9, 11–14]. В отличие от параметрических методов, где предполагается определённая форма функции (например, линейная или квадратичная), непараметрические методы основаны на использовании ядерных оценок, которые позволяют учесть локальные особенности данных.

Одним из основных преимуществ непараметрической регрессии является её гибкость и способность адаптироваться к различным формам зависимости между переменными. Это делает её особенно полезной в ситуациях, когда данные имеют сложную структуру.

Ядерные функции играют ключевую роль в непараметрических методах оценки функции регрессии. Они применяются для распределения весов по выборке наблюдений, которые в дальнейшем используются для оценки значения прогнозируемой переменной. Вот некоторые из наиболее распространённых видов ядерных функций:

Гауссово ядро (нормальное ядро) – одна из самых популярных ядерных функций, которая задаётся формулой

$$K(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}m^2}, \quad (1)$$

где m – вектор признаков. Гауссово ядро придаёт больший вес ближайшим соседям и убывает с увеличением расстояния между точками, что делает его особенно полезным для учёта локальных особенностей данных.

Косинусоидальное ядро: задаётся как

$$K(m) = \frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{\pi}{2}m\right).$$

Выбор подходящей ядерной функции зависит от конкретной задачи и характеристик данных. Например, Гауссово ядро часто используется для учёта локальных особенностей и может быть эффективно в задачах с большим количеством переменных. В исследовании в разработке алгоритма управления использовалось это ядро.

3. Разработанный алгоритм управления

Разработанный алгоритм управления относится к обучающимся системам управления. Основным принципом, который положен в основу построения систем автоматического управления (в классических регуляторах), является принцип

управления по отклонению или принцип отрицательной обратной связи.

Малое количество априорной информации об объекте приводит к необходимости совмещать изучение объекта и управление им. Именно с этой целью в рамках исследования разработан алгоритм управления, включающий в себя поисковый шаг и учет опыта управления объектом.

Математическое описание разработанного алгоритма можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} x_y(x^*(t), x(t), x(t-1)) &= \\ &= M(x^*(t), x(t)) + \Delta x(x^*(t), x(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_y(x^*(t), x(t), x(t-1))$ – сформированный вход на П-регулятор; $M(x^*(t), x(t), x(t-1))$ – собранный опыт в управлении объектом; $\Delta x(x^*(t), x(t))$ – поисковый шаг.

Формирование опыта управления

Обучающая выборка для алгоритма непараметрической регрессии представляет собой разность между требуемым состоянием объекта и его текущим состоянием. Это означает, что вместо подбора задающего воздействия подбирается шаг, на который необходимо изменить задающее воздействие.

Опыт управления в алгоритме формируется следующим образом. Формируется выборка наблюдений, состоящая из разницы между выходным значением и задающим значением $x_s = (\Delta x_i^*, \Delta x_i), i = 1, n$, где n – объем выборки наблюдений, $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$.

$$M(x^*(t), x(t), x_s) = \Delta x_n^* + \frac{\sum_{i=2}^n \Delta x_i^* \Phi\left(\frac{\Delta x - \Delta x_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=2}^n \Phi\left(\frac{\Delta x - \Delta x_i}{c_s}\right)}, \quad (3)$$

где Φ – ядро Гаусса (1).

Поисковый шаг

Поисковый шаг является второй составляющей алгоритма управления. Он позволяет определить направление изменения задающего воздействия на основе опыта управления.

Размер поискового шага может быть фиксированным или адаптивным. В первом случае размер шага определяется заранее и не изменяется в процессе работы алгоритма. Во втором случае размер шага может изменяться в зависимости от результатов предыдущих шагов.

Адаптивный размер шага позволяет более точно настроить алгоритм под конкретный объект управления и обеспечить более эффективное управление.

Важно отметить, что «неудачная» настройка поискового шага может привести к нестабиль-

ности всей управляемой системы. В связи с этим важно не пренебрегать этой частью алгоритма управления.

В качестве поискового шага при проведении исследования был взят принцип работы П-регулятора, при $K=0.4$.

$$x(x^*(t), x(t)) = K(x^*(t) - x(t)). \quad (4)$$

Таким образом, данный алгоритм управления представляет собой сочетание опыта управления, полученного с помощью алгоритма непараметрической оценки функции регрессии, и поискового шага, который определяет направление изменения задающего воздействия. Такой подход позволяет обеспечить эффективное управление объектом и учесть его специфику.

4. Математическая модель анализируемого процесса

В ходе построения математической модели будет рассмотрен процесс, описанный на рисунке 1. Используется объект, описываемый следующим равенством:

$$x(u) = u^2 - 16u + 10. \quad (5)$$

Как отображено на рисунке 1, процесс объединен в контур с П-регулятором. В проводившемся исследовании пропорциональный коэффициент П-регулятора $K_p=1.14$.

На первом этапе анализировалась способность П-регулятора управлять таким объектом.

Результаты управления представлены на рисунке 2.

Хотелось бы обратить внимание на 2 зоны, выделенные овалами. На них отчетливо видно, что изменение выходного значения объекта на единицу времени зависит от разницы между задающим воздействием и текущим состоянием объекта. Иными словами, возможно дать задающее значение, при котором достижение объектом требуемого состояния будет быстрее, чем при уравнивании задающего значения и требуемого состояния.

Повторно отметим, что эта математическая модель используется для «симуляции» системы с длительным переходным процессом.

5. Управление изучаемой системой разработанной алгоритмом управления

Постановка эксперимента

Была поставлена серия экспериментов по исследованию эффективности разработанного адаптивного алгоритма управления при управлении системой, состоящей из безынерционного объекта и П-регулятора (рисунок 1). Эффективность выражается в сокращении времени переходного процесса при управлении системой благодаря технологии «смены цели», встроенной в систему управления.

Для осуществления эксперимента было разработано специальное программное обеспечение

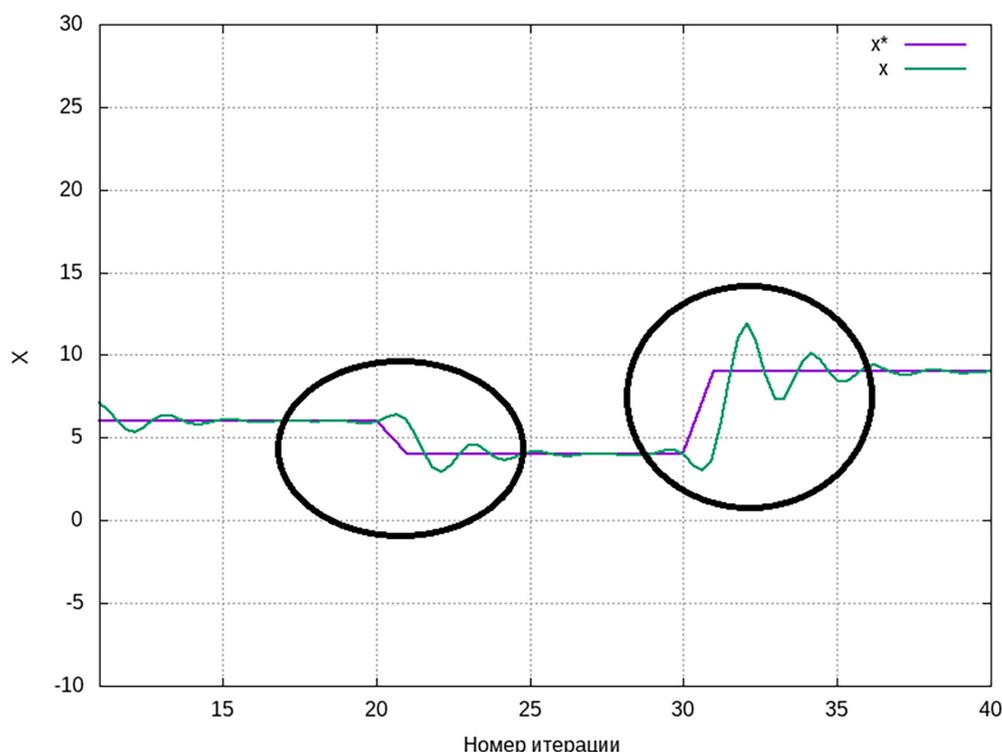


Рисунок 2. Управление представленным объектом при помощи П-регулятора

(СПО). Разработанное СПО представляет собой набор модулей, к каждому из которых можно подключить источник данных на вход или выход. Модули бывают следующего типа:

- Объект управления;
- П-регулятор;
- ПИД-регулятор;
- Разработанный адаптивный регулятор.

В качестве источника данных могут использоваться:

- Данные с текстового файла;
- Данные с другого модуля.

В качестве потребителя данных может использоваться:

- Текстовый файл;
- Другой модуль.

Для построения эксперимента была сформирована обучающая выборка $x_s = (\Delta x_i^*, \Delta x_i)$, $i = 1, n$, где n – объем выборки наблюдений, $n = 1000$. Обучающая выборка была сгенерирована путем изменения задающего воздействия каждые 50 итераций случайным образом. Процесс управления представлен на рисунке 3.

Результаты эксперимента

Представим результаты эксперимента. В первую очередь отобразим ключевые точки, на которых было произведено изменение задающего значения (таблица 1).

В качестве критерия эффективности рассмотрим процент итераций, при которых $\varepsilon = |x^* - x| < \zeta$, $\zeta = 0.2$, такая характеристика позво-

Таблица 1
Изменение задающего воздействия

Номер итерации	x^*
0	10
10	2
20	8
30	9
40	0
50	3
60	4
70	7
80	8
90	4

лит определить степень эффективности предлагаемого алгоритма.

В качестве первого эксперимента предлагается не применять внешний регулятор. Результаты управления продемонстрированы на рисунке 4.

В первом эксперименте $\varepsilon = 68\%$. Как мы видим из рисунка 4, при частой смене задающих воздействий управляемая система почти треть времени не достигает задающего воздействия.

В качестве заключительного эксперимента в качестве внешнего регулятора был применен разработанный адаптивный алгоритм. Результаты управления продемонстрированы на рисунке 5.

В заключительном эксперименте $\varepsilon = 92\%$. Эксперимент на рисунке 5 подтверждает эффек-

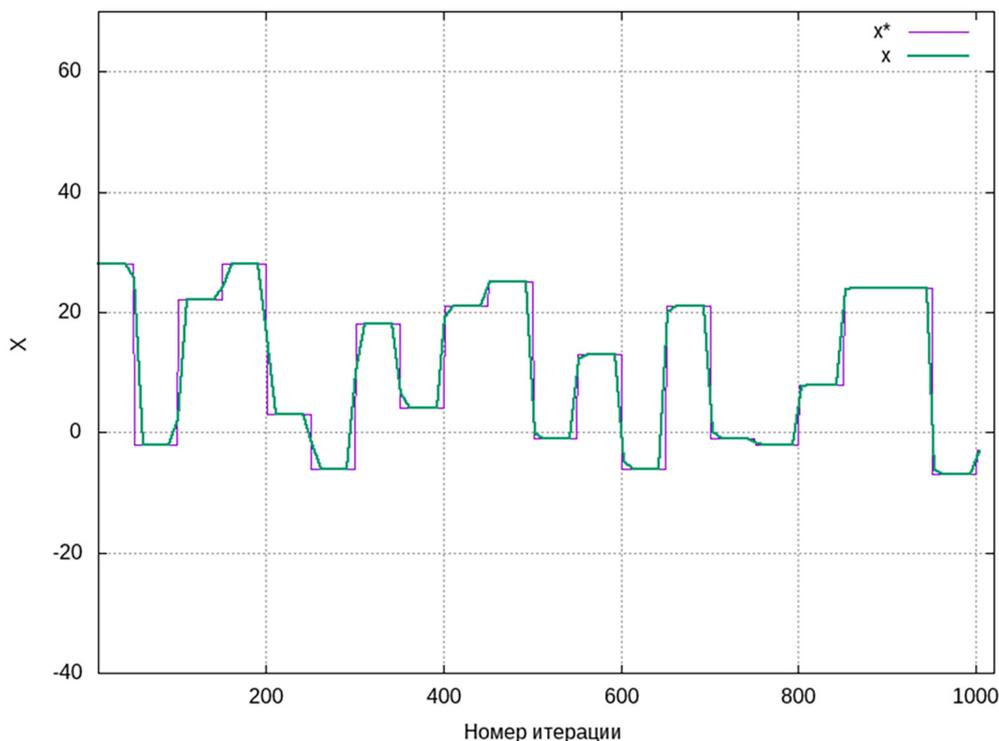


Рисунок 3. Процесс формирования обучающей выборки

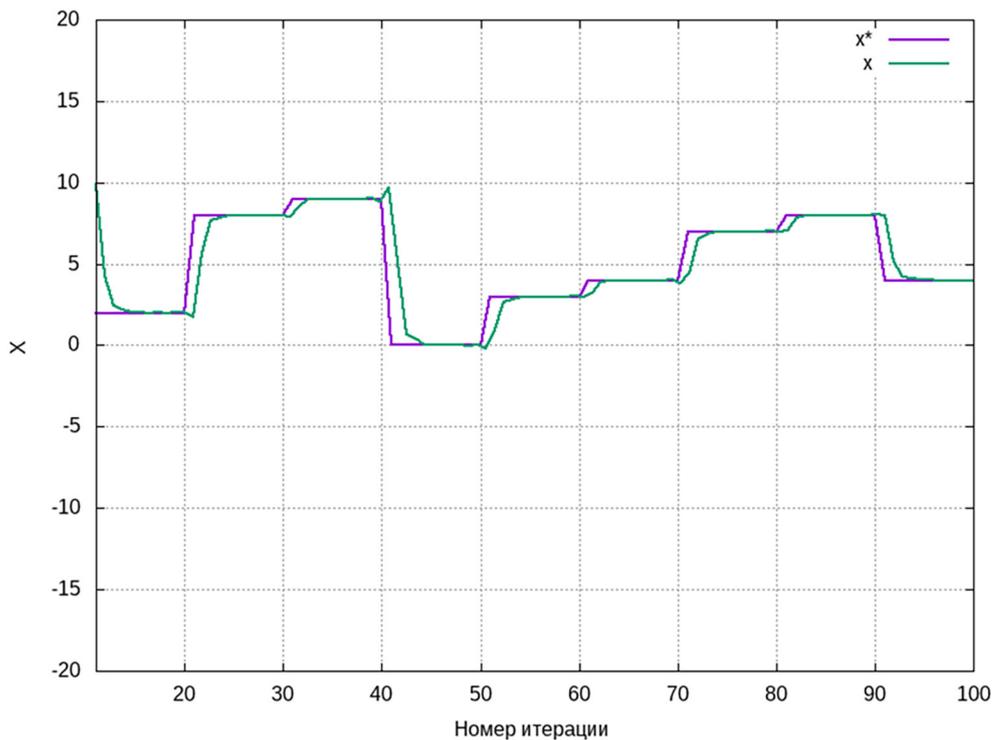


Рисунок 4. Саморегулирование системы управления

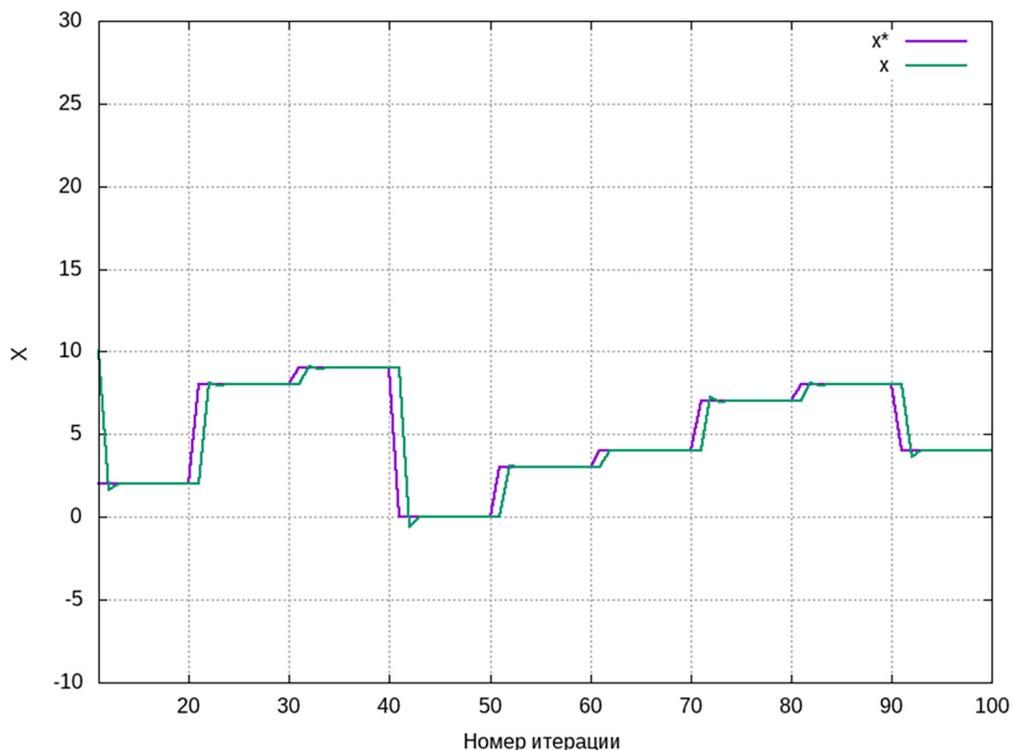


Рисунок 5. Управление исследуемой системой при помощи разработанного алгоритма

тивность разработанного алгоритма. Это позволяет предположить, что сформированный подход по управлению может увеличить эффективность управления процессами с длительными переходными процессами.

Заключение

В ходе эксперимента была подтверждена эффективность разработанного алгоритма управления. Разработанный алгоритм управления от-

носится к классу дуального управления [15–17]. Обучение алгоритма происходит при помощи непараметрической оценки функции регрессии. Благодаря технологии «смены цели», встроенной в алгоритм, время переходного процесса при управлении системой сократилось кратно. Это позволяет сделать вывод о том, что разработанный подход может быть успешно применён для управления различными системами.

Дальнейшие исследования будут направлены на более детальное изучение работы алгоритма в разных условиях. Также планируется

адаптировать разработанный алгоритм управления исследуемым объектом в случае наличия «неравномерности» в переходном процессе объекта, а также для управления многомерными объектами.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20070, <https://rscf.ru/project/25-19-20070/>, гранта Красноярского краевого фонда науки.

Список литературы

- [1] Гаркушенко В. И., Дегтярев Г. Л. Теория автоматического управления: учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. 274 с.
- [2] Поляк Б. Т., Хлебников М. В. Новые критерии настройки ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2022. № . 11. С. 62–82.
- [3] Бобырь М. В., Милостная Н. А., Ноливос К. А. Комбинация нечетко-цифрового фильтра и ПИД-регулятора в задаче управления термоэлементом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. № . 9. С. 473–480.
- [4] Баранов О. В. Алгоритм настройки стабилизирующего ПИД-регулятора квадрокоптера // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № . 10. С. 829–838.
- [5] Пшихопов В. Х. Медведев М. Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. Москва: Наука, 2011. 350 с.
- [6] Петрова Ю. С., Амелин С. А. Метод разработки адаптивного регулятора в системе управления пароперегревателя // Новые технологии в учебном процессе и производстве. 2023. С. 485–486.
- [7] Воронежская Е. Е., Мельникова В. И., Ивашкин Е. Г. Моноамины как адаптивные регуляторы развития: феномен и механизмы действия // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. 2021. Т. 71. № . 3. С. 295–305.
- [8] Хань Н. Д., Кузнецов В. Е., Вынг К. Н. Синтез адаптивного регулятора для повышения качества движения рулевого привода при действии внешней нагрузки // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)». 2021. Т. 1. С. 341–345.
- [9] Медведев А. В. Основы теории непараметрических систем. Идентификация, управление, принятие решений: монография. СибГУ им. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. 732 с.
- [10] Бушуева Н. С., Козырь Б. Ю., Запривода А. А. Многоуровневое Гибридное Управление инфраструктурными программами // Scientific Journal of Astana IT University. 2020. № . 2. С. 71–85.
- [11] Бабилуа П. К., Надарая Э. А. Об одной непараметрической оценке пуассоновской функции регрессии // Теория вероятностей и ее применения. 2024. Т. 69. № . 2. С. 218–232.
- [12] Орлов А. И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № . 160. С. 130–162.
- [13] Лапко А. В., Лапко В. А. Нетрадиционная методика выбора коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрической регрессии // Измерительная техника. 2023. № . 2. С. 3–7.
- [14] Симахин В. А. и др. Непараметрические алгоритмы идентификации в задачах акустического зондирования атмосферы. 2021.
- [15] Яковенко П. Г. Синтез оптимальных управлений подвижными объектами во время переходных процессов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 12.
- [16] Чжан Е. А., Кемпф Д. А. Модификация непараметрического алгоритма моделирования и дуального управления многомерными процессами в условиях неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № . 3. С. 7–13.
- [17] Раскина А. В. и др. Дуальное управление неустойчивым линейным динамическим объектом с применением алгоритмов стабилизации // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № . 9. С. 30–33.

CONTROL OF SYSTEMS INCLUDING CONTROL OBJECTS AND PARAMETRIC REGULATORS

E. D. Mikhov, A. V. Karavanov

*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, The Russian Federation*

The article discusses a new control algorithm for systems with long transient processes. The relevance of the study is due to the growing use of small spacecraft for various purposes, including scientific research, communication and observation. These devices have a limited resource for adjusting motion due to the wear of additional engines and a limited volume of the working fluid. Development and implementation of new control algorithms aimed at reducing the correction time (transient process) can significantly improve the efficiency of using small spacecraft. This will not only increase their service life, but will also expand the possibilities of their application in various fields. The developed algorithm is based on a nonparametric estimate of the regression function and consists of two parts: accumulated experience about the object and a search step. An inertialess process controlled by a P-controller was taken as the control object. A transient process occurs in such a system. The transient process time was chosen as a criterion to evaluate the control efficiency. The comparison showed that control of the system using a P-controller is less efficient than the developed algorithm. The results of the study can be useful for developing more efficient control systems, especially in conditions where high control speed is required.

Keywords: P-controller, control system, nonparametric estimation of the regression function, transient process, small spacecraft.

References

- [1] Garkushenko V.I., Degtyarev G.L. Theory of automatic control: Textbook. Kazan: Publishing house of Kazan. state tech. university, 2010. 274 p.
- [2] Polyak B.T., Khlebnikov M.V. New criteria for tuning PID controllers //Automation and telemetry. 2022. No. 11, pp. 62–82.
- [3] Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Nolivos K.A. Combination of fuzzy-digital filter and PID controller in the problem of thermoelement control //Mechatronics, automation, control. 2022. Vol. 23. No. 9, pp. 473–480.
- [4] Baranov O.V. Algorithm for tuning a stabilizing PID controller of a quadcopter // Bulletin of higher educational institutions. Instrument engineering. 2021. Vol. 64. No. 10, pp. 829–838.
- [5] Pshikhopov V. Kh. Medvedev M. Yu. Control of moving objects in certain and uncertain environments. Moscow: Nauka, 2011. 350 p.
- [6] Petrova Yu. S., Amelin S.A. Method for developing an adaptive controller in the superheater control system // New technologies in the educational process and production. 2023, pp. 485–486.
- [7] Voronezhskaya E.E., Melnikova V.I., Ivashkin E.G. Monoamines as adaptive regulators of development: phenomenon and mechanisms of action // Journal of Higher Nervous Activity named after I. P. Pavlov. 2021. Vol. 71. No. 3, pp. 295–305.
- [8] Khan N.D., Kuznetsov V.E., Vyng K.N. Synthesis of an adaptive controller to improve the quality of steering drive movement under external load // International Scientific Conference on Control Problems in Technical Systems. – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Saint Petersburg State Electrotechnical University LETI named after V.I. Ulyanov (Lenin), 2021. Vol. 1, pp. 341–345.
- [9] Medvedev A.V. Fundamentals of the Theory of Nonparametric Systems. Identification, Control, Decision Making: monograph. Siberian State University named after M.F. Reshetnev. Krasnoyarsk, 2018. 732 p.
- [10] Bushueva N.S., Kozyr B. Yu., Zaprivoda A.A. Multi-Level Hybrid Control of Infrastructure Programs // Scientific Journal of Astana IT University. 2020. No. 2, pp. 71–85.
- [11] Babilua P.K., Nadaraya E.A. On One Nonparametric Estimate of the Poisson Regression Function // Probability Theory and Its Applications. 2024. Vol. 69. No. 2, pp. 218–232.
- [12] Orlov A.I. Probabilistic-statistical models of correlation and regression // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2020. No. 160, pp. 130–162.

- [13] Lapko A. V., Lapko V. A. Unconventional method for selecting the coefficients of fuzziness of kernel functions in nonparametric regression // Measuring equipment. 2023. No. 2, pp. 3–7.
- [14] Simakhin V. A. et al. Nonparametric identification algorithms in problems of acoustic sounding of the atmosphere. 2021.
- [15] Yakovenko P. G. Synthesis of optimal controls for moving objects during transient processes // Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences. 2008. No. 12.
- [16] Zhang E. A., Kempf D. A. Modification of a nonparametric algorithm for modeling and dual control of multidimensional processes under uncertainty // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2020. Vol. 16. No. 3, pp. 7–13.
- [17] Raskina A. V. et al. Dual control of an unstable linear dynamic object using stabilization algorithms // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2021. No. 9, pp. 30–33.

Сведения об авторах

Михов Евгений Дмитриевич – доцент кафедры РЭБ СФУ, канд. техн. наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2014 году. Область научных интересов: математическое моделирование, агентные системы, системный анализ.

Караванов Александр Владимирович – преподаватель кафедры ОВП СФУ. Окончил Сибирский федеральный университет в 2014 году. Область научных интересов: непараметрическая оценка функции регрессии, восстановление пропусков в выборке наблюдений, системный анализ, непараметрические алгоритмы классификации.